

# 50 W 級小型スターリングエンジンの設計・試作

船舶技術研究所 平田宏一

## 1. まえがき

スターリングエンジンは高熱効率性、燃料の多様性及び低公害性等の優れた特徴を有する動力源であるが、未だ民生レベルでの実用域に達していないのが現状である。スターリングエンジンの実用化を阻む問題点として、多数の伝熱管を溶接して製作される熱交換器の製造コストが高いこと及びエンジン重量当たりの出力が小さいことがあげられる。本報では、それらの解決策を見出すことを目的とし、簡略化した熱交換器を採用した実験用小型スターリングエンジンの設計・試作を行う。

## 2. 試作エンジンの構造

### 2.1 目標性能及び仕様

試作するエンジンは、小型エンジンに適した熱交換器及びピストン駆動機構の形式を見出すことを目指しており、様々な形式の熱交換器及びピストン駆動機構を実際に試作し、実験の評価を行うことを考えている。

試作エンジンの一次設計で、エンジン寸法を決定し、出力及びエンジン回転数を予測するに当たって、著者らが提案している多種エンジンの実測データに基づく性能予測法<sup>(1)</sup>を用いる。本手法は、圧力、温度、容積、エンジン回転数及び最大軸出力等を次元解析法によって整理したものであり、作動ガスの種類が軸出力に及ぼす影響やエンジン回転数を予測できるという特徴がある。一方、エンジンを小型化させるためには、高いエンジン回転数で運転させることが必要である。本予測法によると、パワーピストンの行程容積が小さいほど、高いエンジン回転数が得られる。本予測法による計算結果及び後述する熱交換器やピストン駆動機構の構造を検討した結果から、試作エンジンのシリンダ径を 36 mm、ストロークを 10 mm とし、目標軸出力を 50 W としている。

図 1 は、計算結果の一例として、パワーピストンの行程容積を  $9.9 \text{ cm}^3$ 、膨張空間内ガス温度  $T_E$  を 600、圧縮空間内ガス温度  $T_C$  を 40 とし、作動ガスにヘリウム及び空気を使用した場合、エンジン内平均圧力  $P_m$  と最大軸出力  $L_S$  及びそのときのエンジン回転数  $N$  との関係を示している。こ

れより、作動ガスにヘリウムを使用し、 $P_m=0.8 \text{ MPa}$  とした場合、エンジン回転数が約 4000 rpm で目標軸出力である 50 W が得られることがわかる。

表 1 に目標性能及び主な仕様を示す。小型エンジンは入熱量に対する熱伝導損失の割合が大きくなるため、高い熱効率は望めない。そのため、目標熱効率を 15% とする。これは従来の高性能エンジンより、かなり低い値である。エンジン内最高圧力（許容圧力）は、一般に市販されている配管部品の利用を考慮して、1.1 MPa に設定する。ヒータ管最高温度は、ヒータ管材料の強度と肉厚との兼ね合いで決定される。ここでは、材料に SUS303 を用いることとし、ヒータ管最高温度を 650~800 でヒータの設計することとする。

### 2.2 基本構造

試作エンジンの基本構造は、著者らが開発を進

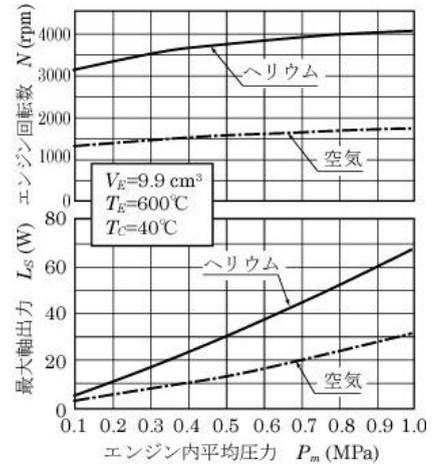


図 1 実測データに基づく性能予測法の計算結果

表 1 目標性能及び主なエンジン仕様

シリンダ径×ストローク	36×10 mm	
ピストン位相差	90.2 deg	
作動ガス	ヘリウム / 空気	
目標軸出力	50 W	
目標熱効率	15 %	
加熱形式	電熱線 / 燃焼ガス	
冷却形式	水冷	
定格運転時	定格回転数	4000 rpm (ヘリウム)
	エンジン内平均圧力	0.8 MPa
	膨張空間内ガス温度	600
	圧縮空間内ガス温度	40
設計時(許容値)	エンジン内最高圧力	1.1 MPa
	ヒータ管最高温度	650~800

めている 100 W 級エンジン<sup>(2)</sup>をベースにする。図 2 に試作エンジンの構造を示す。試作エンジンはディスプレイサとパワーピストンとを直線上に配置した形である。再生器をディスプレイサに内蔵することでエンジン内の空間を有効に利用でき、エンジンの小型化に貢献している。

ヒータ及びクーラには、簡易的な内管往復式熱交換器を採用する。上述の 100 W 級エンジンでは、複数の伝熱管を円周状に配置することで伝熱面積の増大を図っているが、これはコストの増大を招くばかりでなく、ディスプレイサの回転運動を厳しく制限する必要があるため、高い組立精度が要求される。そのため、試作エンジンでは、それぞれ 1 本ずつの内管と外管とをシリンダの中心線上に配置し、ディスプレイサ上端のヒータ内管、下端のクーラ内管及びシリンダ中央に配置したクーラの外管を組立式とすることで、構造の簡単化を試みる。このような形式は、従来の多管式や 100 W 級エンジンに採用した熱交換器より、溶接箇所が少なくでき、大幅なコスト低減が可能であると考えられる。

ピストン駆動機構には、クロスヘッド機構やスコッチ・ヨーク機構を検討したが、高回転で運転するエンジンでは、バランス性が最も重要であると考え、優れたバランス性を有するロンビック機構<sup>(3)</sup>を採用することとする。

### 2.3 性能試算

試作エンジンの詳細な出力特性を試算するため、再生器における圧力損失、作動ガスの漏れ、駆動機構及びシールの機械損失及びバッファ損失を考慮した等温モデル<sup>(4)</sup>を用いて性能試算を行う。図 3 は、計算結果の一例として、平均圧力  $P_m$  を 0.8

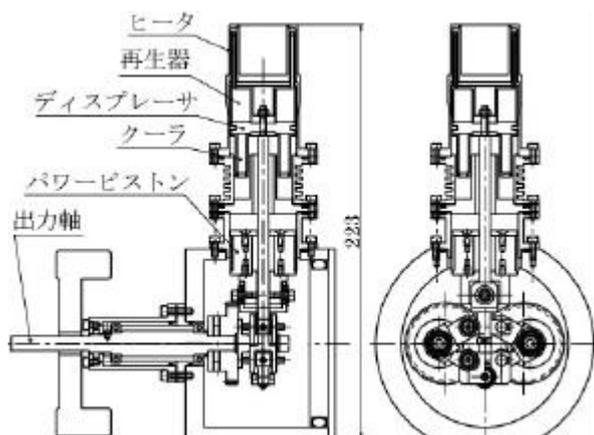


図 2 試作エンジンの構造

MPa、膨張空間内ガス温度  $T_E$  を 600、圧縮空間内ガス温度  $T_C$  を 40 とし、作動ガスにヘリウム及び空気を使用した場合、エンジン回転数  $N$  と図示出力  $L_i$  及び軸出力  $L_s$  との関係を示している。計算条件は、概ね試作エンジンの寸法に設定しているが、機械損失における摩擦係数等は明確でないため、100 W 級エンジンの実測データに基づき推測している。これより、図示出力及び軸出力は、エンジン回転数が 4000 rpm 以下の範囲で、作動ガスの相違による影響をほとんど受けていないことがわかる。これは再生器での圧力損失が小さいためである。また、図 1 の計算結果と同様、軸出力はエンジン回転数が 4000 rpm において軸出力 50 W を達成している。

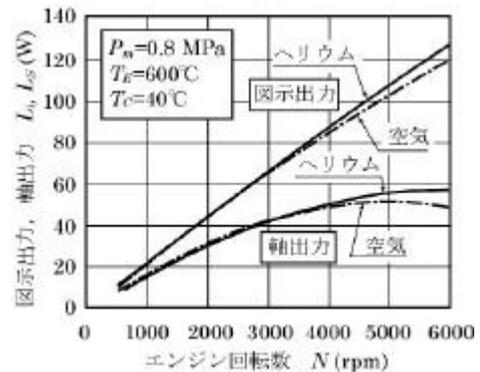


図 3 シミュレーション計算による性能試算

## 3. 要素設計

### 3.1 ヒータ

試作エンジンのヒータには、図 4 に示すような様々な形式を検討している。(a)は図 2 に示した形式であり、内管及び外管の環状部を作動ガスが流れる。(b)はシリンダ上部の内側の伝熱部をねじで固定するため、溶接箇所がないのが特徴である。ただし、内側の伝熱部の温度はシリンダからの熱伝導に依存するため、高い伝熱性能は望めない。(c)はディスプレイサ上端の内管を仕切り板として利用することで伝熱面積を増加させている。これら(a)~(c)の形式は、内管あるいは外管の仕切りによって膨張空間が分割されており、作動ガスが伝熱流路を十分な流速で流れず、伝熱性能が低下することがあり得る。一方、(d)はディスプレイサの側部に作動ガスの流路を設けることで、全ての伝熱流路を有効に利用できる形式である。現在は(a)の形式だけを試作しているが、今後、その他の形式を試作し、小型エンジンに適した熱交換器の

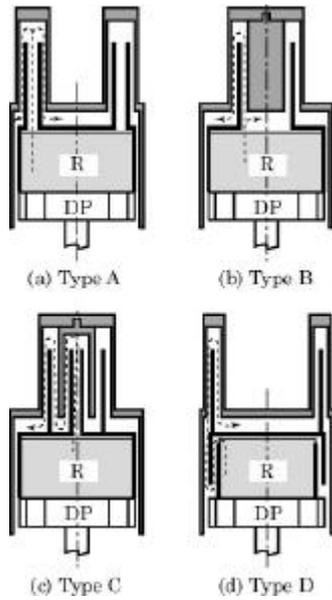


図4 ヒータ形式

形式を実験的に見出すことを考えている。

ヒータの伝熱計算は、次式に示すように、シュミット理論で求まる膨張出力  $L_E$  に再熱損失  $Q_r$  及びシリンダの熱伝導損失  $Q_{cd}$  を加えたヒータ入力  $Q_1$  と、管内熱伝達率  $h$  及び伝熱面積  $S$  から求めたヒータ入力  $Q_2$  とを連立させることで、ヒータ管温度  $T_w$  を算出する。

$$Q_1 = L_E + Q_r + Q_{cd} \quad (1)$$

$$Q_2 = hS(T_w - T_E) \quad (2)$$

計算に必要なヒータ及び再生器内のガス流速はディスプレイサの平均ピストン速度から求めており、一般の多管式熱交換器の設計手法を適用するために、環状部における水力直径を基準とする。

図5は、試作したヒータに対する計算結果の一例であり、内管と外管との隙間  $C_L$  をパラメータとし、エンジン内平均圧力  $P_m$  とヒータ管温度  $T_w$  との関係を示している。これより、 $C_L=0.5$  mm、 $P_m=0.8$  MPa において、膨張空間内ガス温度  $T_E$

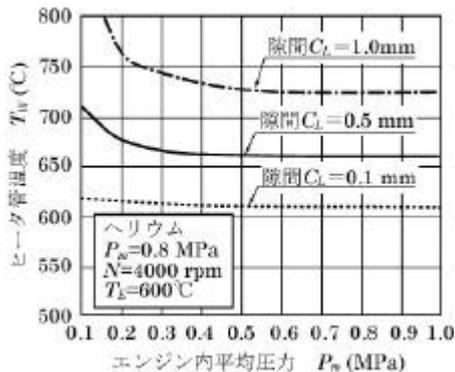


図5 ヒータにおける伝熱計算の結果

を 600 にするためには、ヒータ管を 660 まで加熱する必要があることがわかる。また、伝熱性能は、隙間  $C_L$  が小さいほど向上する。しかし、この隙間は、内管と外管との接触を避けるため、ピストン駆動機構の組立精度を考慮して決定する必要がある。

### 3.2 クーラ

クーラの伝熱計算は、クーラ単体での管内及び管外熱伝達を算出し、冷却熱量等を求めている。その結果、図3に示したクーラ形状では、冷却水側の伝熱面積が不足しているため、設定した圧縮空間内ガス温度 (40 ) を維持するのは難しいことが確認されている。また、所定の冷却熱量を得るためには、多量の冷却水流量が必要であるが、出力特性に対する実験には差し支えないと考えている。

### 3.3 再生器

試作エンジンの再生器寸法は、ディスプレイサ形状及び製作上の制約から設定されており、外径 34 mm、内径 13 mm、長さ 17.5 mm としている。また、再生器内の作動ガスの流れは、ヒータ及びクーラとの連結部の形状や位置に大きく影響を受ける。すなわち、図4に示したような異なるヒータ形式では、再生器形状を適切に設定しないと、作動ガスが再生器内を有効に流れないことがあり得る。そのため、再生器形状はヒータ形状とともに検討する必要がある。

### 3.4 ピストン駆動機構

ピストン駆動機構には図6に示すロンビック機構を採用する。ロンビック機構は、2つの歯車、ヨーク及び4本の連接棒で構成されており、図中の連接棒長さ  $L$ 、クランクアーム長さ  $R$  及び偏り  $e$  を適切に設定することで、直線上に配置したディスプレイサとパワーピストンとに 90° 程度の位相差を設けることができる。理想的に組み立てられれば、両ピストンは厳正直線運動を行う。しかし、組立精度が十分でない場合、ディスプレイサ・ロッド及びパワーピストンが傾くため、各ピストンにサイドスラストが生じ、摩擦損失が増大する。そこで、試作エンジンでは、ディスプレイサとパワーピストンにそれぞれ1箇所ずつの回転可能な節を設けている(図8)。これにより、組立精度に対する逃げを確保できるが、両ピストンに直動のためのガイドを設ける必要がある。

ロンビック機構は2つのクランク機構を用いており、スコッチ・ヨーク機構や単クランク機構と比

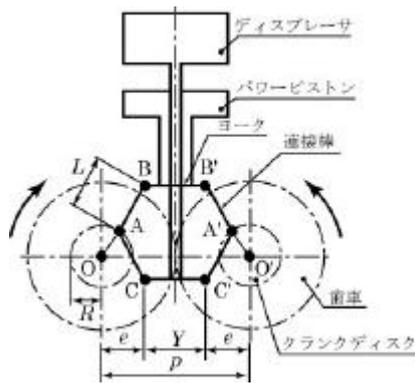


図6 ロンピック機構

べて、クランクケースは大型化する傾向にある。そのため、小型エンジンに最適な形式であるとは言い難い。今後の実験的研究によって、小型化のための最適な機構を明らかにしたいと考えている。

### 3.5 シール装置

試作エンジンの主なシール装置には、ディスプレイサ及びパワーピストンのピストンリング、ディスプレイサ・ロッドの往復動軸シール、出力軸端の回転軸シールがある。これらは様々な形式のシールが採用できるように設計されている。一次試作においては、ディスプレイサのピストンリングには幅 2 mm のエンドレスリング (PTFE 製) を採用している。パワーピストンには、幅 19 mm のエンドレスリング (PTFE 製) を採用しており、これは高いシール性能を確保するとともに、直動のためのガイドとして作用する。ディスプレイサ・ロッドの往復動軸シールには、ガイドを兼ねたすべり軸受 (ASK 社) を用いている。

### 4. エンジン試作

以上の設計に基づき試作した実験用エンジンを図7に、ピストン駆動機構を図8に示す。エンジンの出力軸には直流モータを流用した発電機が取り付けられている。実験において、加熱は最大容量 500 W 程度の電熱線を使用し、冷却はクーラの外周にジャケットを取り付け、冷却水を流す。エンジンとしての運転に先立ち、直流モータによってエンジンを外部から回転させ、冷凍機として十分に働くことを確認しており、熱交換器は概ね設計通りに機能するものと考えている。

### 5. あとがき

以上、50 W 級実験用エンジンの設計・試作を行った。しかし、試作エンジンは、ロンピック機

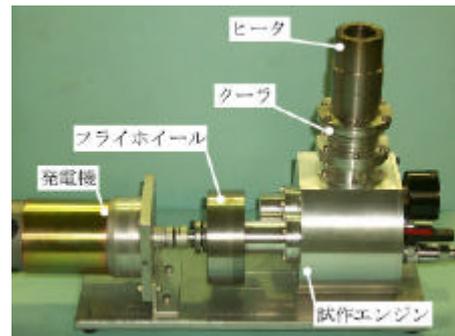


図7 試作エンジンの外観

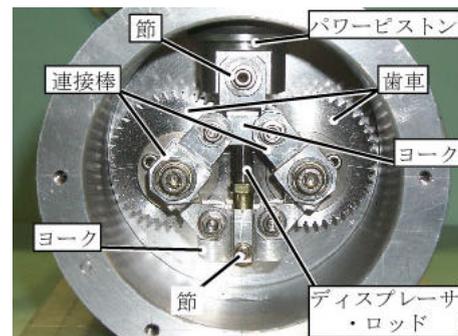


図8 試作エンジンのピストン駆動機構

構の加工精度が十分でないためにピストンの運動が理想的に行われていないことやシール装置の調整が十分でないこと等の問題があり、自力運転に至っていない。ピストン駆動機構及びシール装置を調整し、所定の出力を達成させることが当面の目標である。

さらに、各部の温度、膨張・圧縮空間内の圧力変動及び軸トルク等を測定し、詳細な出力特性及びヒートバランスを求める。これらを実験的に検討することによって、小型かつ高効率な熱交換器及び小型でバランス性に優れたピストン駆動機構の設計技術が得られ、小型エンジンの最適化が図られるものと考えている。

### 参考文献

- (1) 岩本昭一, 平田宏一, 戸田富士夫, スターリングエンジンの性能予測法, 機論, 投稿中, 1998.
- (2) 平田宏一ほか 3 名: 小型発電機用スターリングエンジンの開発に関する基礎研究 (第 1 報 エンジンの設計・試作並びに性能特性), 機論, 64-621B, (1998), 1600-1607.
- (3) Hargreaves, G. M.: The Philips Stirling Engine, Elsevier, (1991), 130-141.
- (4) 平田宏一ほか 2 名: 小型発電機用スターリングエンジンの開発に関する基礎研究 (第 2 報 シミュレーション計算によるエンジンの性能予測法), 機論, 64-621B, (1998), 1608-1615.